ارائه یک روش فرا ابتکاری مؤثر برای زمان‌بندی پروژه با حالت‌های چندگانه★

محمدحسن سبط[۱] محمدرضا افشار[۲] یعقوب علیپوری[۳]

چکیده در این مقاله، الگوریتم دسته‌ی پرندگان کاملاً آگاه (FIPS) برای حل مسأله‌ی زمان‌بندی پروژه، تحت محدودیت منابع و محدودیت‌های پیش‌نیازی در حالت چندگانه (MRCPSP)، با هدف حداقل نمودن زمان پروژه پیشنهاد شده‌است. در FIPS پیشنهادی، روش نمایش کلید تصادفی و روش نمایش لیست حالات اجرایی مربوط در جهت کدگذاری استفاده می‌گردد و برای رمزگشایی نیز، از روش تولید زمان‌بندی سری چندحالته، کمک گرفته خواهد شد. به‌ویژه، تابع تناسب جدیدی برای کاهش زمان محاسبات برنامه و انحراف متوسط ارائه می‌شود. مجموعه‌های پایه و شناخته‌شده‌ی کتابخانه مسائل زمان‌بندی پروژه‌ها (PSBLIB) به‌منظور آزمایش الگوریتم FIPS پیشنهادی به‌کار گرفته شده‌اند که نتایج محاسباتی حاصل از آن و مقایسات انجام شده، کارآمدی الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی زمان‌بندی پروژه‌ها در حالت چندگانه، محدودیت منابع، الگوریتم دسته‌ی پرندگان کاملاً آگاه، روش نمایش کلید تصادفی.

An Efficient Meta-heuristic Algorithm for Project Scheduling With Multiple Modes

M. H. Seb M. R. Afshar Y. Alipouri

Abstract *In this paper, a Fully Informed Particle Swarm (FIPS) algorithm is proposed for solving the Multi-mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem (MRCPSP) with minimization of project makespan as the objective subject to resource and precedence constraints. In the proposed FIPS, A random key and the related mode list (ML) representation scheme are used as encoding schemes and the multi-mode serial schedule generation scheme (MSSGS) is considered as the decoding procedure. In particular, a new fitness function which reduces the average deviation from optimality and CPU-time is presented. Comparing the results of the proposed FIPS with other approaches using the well-known benchmark sets in PSPLIB validate the effectiveness of the proposed algorithm to solve the MRCPSP.*

Keywords Multi-mode Resource Constrained Project Scheduling Problem, Precedence Constraints, Resource Constraints, Fully Informed Particle Swarm (FIPS) Algorithm, Random Key Representation.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۷/۲ و تاریخ پذیرش آن ۹٤/۱/۲٦ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

(۲) کارشناس ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

(۳) دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

مقدمه

در زمان‌بندی پروژه بـه روش مسـیر بحرانـی (CPM) محدودیت منابع به‌وضوح در نظر گرفته نمی‌شود؛ لـذا، یک فعالیت در آن می‌تواند بعـد از اتمـام فعالیـت‌هـای پیش‌نیازی خود آغـاز شـود. ایـن در حـالی اسـت کـه می‌دانیم وجود محدودیت منابع در تخصـیص منـابع و زمـان‌بنـدی پـروژه اثرگـذار اسـت [1]. ایـن موضـوع، زمینه‌ساز ایجاد مسأله‌ی زمان‌بندی پروژه با محـدودیت منابع (RCPSP) گردید. هدف RCPSP حداقل نمودن زمـان پـروژه بـا در نظـر گـرفتن محـدودیت منـابع و محـدودیت‌هـای پـیش‌نیـازی مـی‌باشـد. در RCPSP کلاسیک برای هر فعالیت یک حالت اجرایی با زمـان و منابع ثابت در نظر گرفته می‌شود. بـا توجـه بـه وجـود محدودیت منابع، چنین شرایطی (یعنی وجود فقط یک حالت اجرایی برای هر فعالیـت) ممکـن اسـت سـبب تأخیر فعالیت‌هـا و بیکـاری منـابع گـردد [2]؛ لـذا، در شرایط عملی، در تقسیم منابع محدود بین فعالیت‌هـای متعدد، برای هر فعالیت چندین حالت اجرایی با زمان و مقداری متفاوت از منابع در نظر گرفتـه مـی‌شـود، کـه برای زمان‌بندی آن بایستی از مسأله‌ی زمان‌بندی پـروژه با محدودیت منـابع در حالـت چندگانـه (MRCPSP) اسـتفاده نمـود. MRCPSP در صـنعت سـاخت بسـیار کـاربردی مـی‌باشـد. بـرای مثـال، بـه‌منظـور انجـام فعالیت‌هایی نظیر بتن‌ریزی یا آروماتوربافی ممکن است به تجهیزات یا کارگران یکسان در یک زمان نیاز داشـته باشیم. در ضمن بعضی از فعالیـت‌هـای سـاخت نظیـر فعالیـــت‌هـــای یکســـان بـــرای طبقـــات مختلـــف در ساختمان‌های بلندمرتبه، عملیاتی تکراری می‌باشند کـه ممکن است به‌طور هم‌زمان آغاز شده و به تجهیزات و کارگران یکسان نیاز داشته باشند. در این موارد با توجه به ناکافی بودن منابع مورد نیاز در یک زمـان، ترکیبـات مختلفی از مقدار منابع، به‌منظور شروع ایـن فعالیـت‌هـا در نظر گرفته مـی‌شـود، کـه هـر ترکیـب یـک حالـت اجرایی نامیده می‌شود و زمان مربـوط بـه خـود را دارا می‌باشد [2].

هدف از حل MRCPSP یافتن یک حالت اجرایی و یک زمان شروع برای هر فعالیت به‌گونه‌ای است کـه زمان پروژه حداقل گردد و محدودیت‌های پیش‌نیازی و منابع رعایت گردند.

سه روش دقیق، ابتکاری و فرا ابتکاری برای حـل MRCPSP وجـود دارد کـه روش‌هـای فـرا ابتکـاری بهتـرین روش‌هـای موجـود مـی‌باشـند [3] و [4]. در ادبیات موضوع، روش‌های فـرا ابتکـاری زیـادی بـرای حل MRCPSP به‌کار گرفته شـده‌انـد [12-7]. یکـی از تکنیک‌های جدید بهینه‌سازی شبیه‌سازی رفتار گروهـی مخلوقات طبیعی است که PSO یکی از آنهاست. کندی و ابرهارت PSO را به‌کمک شبیه‌سازی هجوم پرنـدگان پیشنهاد نمودند. هدف این هجوم یافتن غذا می‌باشد که یک تابع هدف خاص را بهینه‌سـازی مـی‌نمایـد [13]. یکی از مؤثرترین الگـوریتم‌هـای بهینـه‌سـازی دسـته‌ی پرندگان که تاکنون ارائه شـده‌اسـت، دسـته‌ی پرنـدگان کاملاً آگاه (FISP) مـی‌باشـد. در ایـن مقالـه الگـوریتم FIPS مؤثری برای حل MRCPSP پیشنهاد می‌شود.

توصیف مسأله

عموماً مسأله‌ی MRCPSP به این صورت بیان می‌شـود که در MRCPSP، هر پروژه J+2 فعالیت دارد و بـرای هر فعالیت چندین حالت اجرا با زمان و منابع مشخص پیش‌بینی می‌شود. یک فعالیـت j (j=0,…,J+1) کـه در حالت اجرایی m (m∈1,..,Mj) آغاز می‌شـود بایـد در همان حالت اجرایی و بدون جدایش پایان پذیرد [14]. فعالیت‌های شروع و پایان پروژه، فعالیت‌های مجازی با زمان صـفر و بـدون احتیـاج بـه منـابع در نظـر گرفتـه می‌شوند. این فعالیت‌ها به‌ترتیب ۰ و J+1 امین فعالیـت پـروژه مـی‌باشـند. بـین بعضـی از فعالیـت‌هـا روابـط پیش‌نیازی وجود دارد. در این پژوهش، ایـن روابـط از نوع پایان–شروع و بدون وقفه در نظر گرفته شـده‌انـد. برای هـر پـروژه، دو دسـته از منـابع کـه شـامل منـابع تجدیدپذیر و ناپذیر می‌باشد در نظر گرفته می‌شود، که موجودیت منبع تجدیدپذیر k (k=1,..,R) و موجودیت

منبــع تجدیدناپــذیر l ‏(l=1,...,N) بــه‌ترتیــب R_k و N_l می‌باشند. اگر فعالیت j با حالت اجرایی m انجام شـود زمان، مقدار منابع تجدیدپذیر مورد نیاز آن از نـوع k و مقدار منابع تجدیدناپذیر مورد نیاز آن از نوع l به‌ترتیب بـا d_{jm}، r_{jmk} و n_{jml} نمـایش داده مـی‌شـود. هـدف MRCPSP، تحت شرایط عنوان شده، اختصـاص یـک زمان شروع و یک حالت اجرایی به هر فعالیـت اسـت به‌گونه‌ای که زمان پروژه حداقل گردد.

الگوریتم دسته‌ی پرندگان کاملاً آگاه

الگوریتم دسته‌ی پرندگان کاملاً آگاه به‌وسیله‌ی منـدز و همکاران در سال ۲۰۰٤ ارائـه شـد. اسـتراتژی FIPS و PSOی متداول برای یافتن غذا متفـاوت مـی‌باشـد. در FIPS، یـک ذره از اطلاعـات همـه‌ی همسـایه‌هـایش استفاده می‌نماید، در حالی‌کـه در PSOی متعـارف، آن ذره فقـط از اطلاعـات بهتـرین ذره در همسـایگی‌اش استفاده می‌نماید [15]. چهارچوب عمومی FIPS بـدین صورت است که یک ذره در فضـای n بعـدی در نظـر گرفته می‌شود (در PSO هـر راه حـل یـک ذره نامیـده می‌شود). در این فضا، جایگاه هر ذره‌ی i در تکرار t با $X_i^t=\{x_{i1}^t,x_{i2}^t, . . ., x_{in}^t\}$ و هم‌چنین سرعتش با $V_i^t = \{v_{i1}^t,v_{i2}^t, . . ., v_{in}^t\}$ نمایش داده می‌شود. پـس از تولیـد شرایط اولیه برای هـر ذره (شـامل نقطـه‌ی جسـتجو و سرعت اولیه) جایگاه آن ذره از یـک تکـرار بـه تکـرار بعد، براساس معادلات (۱) و (۲) به‌روزرسانی می‌شود.

$$V^{t+1}{}_i=V^t{}_i+\sum_{pm\in Ni}\varphi_k U_k{}^t(pb_k{}^t-X_i{}^t) \qquad (۱)$$

$$X^{t+1}{}_i=X^t{}_i+V_i{}^{t+1} \qquad (۲)$$

کـه V_i^t سـرعت ذره‌ی i در تکـرار t را نمـایش می‌دهد، φ_k مجموع ضرایب شتاب اسـت کـه بـه‌طـور یکنواخت در بین همسایه‌هـای یـک ذره توزیـع شـده است، U_k^t برداری به طول راه حل می‌باشد که اعداش به‌طور تصادفی در بازه‌ی صفر و یک تولیـد مـی‌شـوند (این بردار در هر تکرار تولید مـی‌شـود). pb_k^t جایگـاه بهترین راه حل یافت‌شده تا تکرار t بـه‌وسـیله‌ی ذره‌ی p_k می‌باشد (p_k ذره‌ای در همسـایگی ذره‌ی i اسـت) و X_i^t جایگاه فعلی ذره‌ی i در تکرار t را نمایش می‌دهـد. همان‌طور که در معادله‌ی (۱) مشاهده مـی‌شـود قـانون به‌روزرسانی سرعت شامل دو نوع بردار می‌باشد. بردار اول، سرعت قبلی ذره را نمایش می‌دهـد کـه وظیفـه‌ی آن، ایجاد تنوع در فضای جستجو می‌باشـد. ایـن تنـوع بایستی کنترل شود، بـرای ایـن منظـور، در ایـن مقالـه، ممان اینرسی کاهنده استفاده شده‌است که در بردار اول قانون به‌روزرسانی سرعت ضرب می‌شود (رابطه‌ی ۲).

$$w^t=\frac{wt_{max}-t}{wt_{max}}(w_{max}-w_{min})+w_{min} \qquad (۳)$$

در معادلـــه‌ی (۳)، w_{max} وزن اولیـــه، w_{min} وزن نهایی، wt_{max} حداکثر تکرار الگوریتم و t تعـداد تکـرار فعلی را نمایش می‌دهد.

به‌کمک بردار دوم، هر ذره تلاش مـی‌کنـد تـا بـه بهترین موقعیت همسایه‌هـایش هـم‌گـرا شـود. در ایـن بردار، برای هر ذره p_i، φ مطـابق معادلـه‌ی (٤) توزیـع می‌شود.

$$\varphi_m=\frac{\varphi}{N_i} \qquad \forall p_m\in N_i \qquad (٤)$$

که N_i مجموعه افرادی هستند کـه در همسـایگی ذره‌ی i تعریف شده‌انـد. ارتباطـات همسـایگی توسـط مفهوم توپولوژی جمعیت تعریف می‌شود که بـا توجـه به نوع توپولوژی، به‌وسیله‌ی گـراف دیکتـه مـی‌شـود. شایان ذکر است که این ارتباطات مستقل از جایگاه‌های تعریف‌شده به‌وسیله‌ی ذرات هستند.

مندز و همکـاران پـنج توپولـوژی مختلـف را در قانون به‌روزرسانی سرعت FIPS مـورد آزمـایش قـرار دادند و نشان دادند که در توپولوژی بـا ارتبـاط کمتـر، FIPS عملکرد بهتری از خود نمایش می‌دهد.

هم‌چنین مارکو و اسـتاتزل در سـال ۲۰۰۸ نشـان دادند که وقتی از توپولـوژی بـا ارتبـاط کامـل اسـتفاده می‌شود، ناحیه‌ی جستجو نزدیک مرکز جرم دسته قـرار می‌گیرد [15] و [16]. ایـن مسـأله سـبب مـی‌شـود تـا

احتمال هم‌گرایی به نقطه‌ی بهینه محلی افزایش یابد. از طرفی دیگر، ایشان نشان دادند که در ارتباط توپولوژیکی کمتر به‌دلیل جستجوی هم‌زمان در نواحی مختلف، احتمال یافتن راه حل بهینه‌ی جهانی افزایش می‌یابد. از این‌رو، براساس ملاحظات عنوان‌شده، در مطالعه‌ی حاضر از توپولوژی حلقه استفاده می‌شود.

روش نمایش راه حل‌ها (کدگذاری)

در ادبیات RCPSP روش نمایش کلید تصادفی و لیست تقدم از محبوبیت بیشتری برخوردارند. در روش نمایش لیست تقدم، جایگاه هر فعالیت اولویت نسبی آن‌را برای زمان‌بندی تعیین می‌نماید، اما در روش نمایش کلید تصادفی، مقادیر اولویت، این وظیفه را تقبل می‌نمایند. برخلاف روش نمایش توالی فعالیت‌ها (AL)، در روش نمایش کلید تصادفی (RK) همه‌ی افراد یک زمان‌بندی پیش‌نیازی شدنی را نشان می‌دهند و همه‌ی مسائل مرتبط با شدنی شدنِ پیش‌نیازی به قسمت ارزیابی تابع تناسب انتقال می‌یابد. بنابراین، در این پژوهش تصمیم گرفته شد، تا از شیوه‌ی نمایش کلید تصادفی، برای تعیین اولویت فعالیت‌ها برای زمان‌بندی استفاده شود. هم‌چنین برای اختصاص حالت‌های اجرایی به هر یک از فعالیت‌ها، از لیست حالت‌های اجرایی (ML) کمک گرفته شد؛ از این‌رو، روش نمایش مطابق زیر بیان می‌شود:

دو جایگاه مستقل برای هر ذره در دو فضای n بعدی متفاوت در نظر گرفته می‌شود، فضای اول برای یافتن ترکیب بهینه‌ی اولویت فعالیت‌ها و فضای دوم برای یافتن ترکیب بهینه‌ی حالت‌های اجرایی به‌کار گرفته می‌شود. برای این منظور در فضای اول، جایگاه اول هر ذره، اولویت فعالیت‌ها را برای زمان‌بندی تعیین می‌نماید و در فضای دوم، جایگاه دوم هر ذره، لیست حالت اجرایی مرتبط را نمایش می‌دهد که در هر تکرار براساس معادلات (۱) و (۲) به‌صورت هم‌زمان به‌روز می‌شوند.

جایگاه و سرعت ذره‌ی i مربوط به اولویت فعالیت‌ها به‌ترتیب با $X_i^t=\{x_{i1}^t,x_{i2}^t, ..., x_{in}^t\}$ و $V_i^t = \{v_{i1}^t,v_{i2}^t, ..., v_{in}^t\}$ نمایش داده می‌شود. به‌طور مشابه جایگاه و سرعت ذره‌ی i مربوط به لیست حالت اجرایی به‌ترتیب با $M_i^t =\{m_{i1}^t, ..., m_{in}^t\}$ و $VM_i^t = \{vm_{i1}^t, ..., vm_{in}^t\}$ نمایش داده می‌شود. به‌منظور ساده‌سازی در این پژوهش، هر ذره‌ی i با دو بردار λ و μ $i= (\lambda, \mu)$ نمایش داده می‌شود که λ و μ به‌ترتیب RK و ML می‌باشند.

تولید شرایط اولیه (جایگاه‌ها و سرعت‌ها)

تولید تصادفی جمعیت اولیه، به فضای جستجو تنوع می‌بخشد و به یافتن مناطق امیدوارکننده کمک می‌نماید. بنابراین در این پژوهش جایگاه‌های اولیه‌ی هر ذره‌ی i مربوط به RK و ML به‌طور تصادفی و به‌ترتیب در بازه‌ی [۰ ۱] و [M_i ۱] ایجاد می‌شوند (M_i شمار حالت‌های اجرایی که برای فعالیت i در نظر گرفته شده، می‌باشد). در فرآیند تکامل جمعیت، اگر هر مؤلفه از جایگاه‌ها، کوچک‌تر از حد پایین مرزی و بزرگ‌تر از حد بالای مرزی مربوط شوند؛ آن‌گاه، آن مقدار به نزدیک‌ترین مقدار مرزی تغییر می‌یابد. به‌علاوه، اگر مقادیر اعشاری جهت هر یک از مؤلفه‌های ML به‌دست آید از آن جزء صحیح گرفته می‌شود.

مقادیر اولیه‌ی بردارهای سرعت مربوط به RK و ML به‌طور تصادفی در بازه‌ی $[-V_{max}\ V_{max}]$ تولید می‌شوند که V_{max} حداکثر مقداری است که می‌توان به هر مؤلفه‌ی سرعت اختصاص یابد.

تابع تناسب

ارزیابی یک کروموزوم برای تکامل یک جمعیت توسط تابع تناسب انجام می‌شود. در ادبیات MRCPSP تاکنون چندین تابع تناسب تعریف شده‌اند که تابع تناسب لوا و همکاران آخرین آنها می‌باشد (معادله‌ی ۱) [7]. در این تابع تناسب راه‌حل‌های نشدنی با ERR(μ) مجازات می‌شوند.

$$f(i)=\begin{cases}1-\dfrac{max_mak(P)-mak(i)}{max_mak(P)}, & \text{if } ERR(\mu)=0\\ 1+\dfrac{mak(i)-min_CP}{mak(i)}+ERR(\mu), & \text{otherwise}\end{cases} \quad (5)$$

$$ERR(\mu)=\sum_{l=1}^{N}\max\left\{0,\ \dfrac{\sum_{j=1}^{J}n_{jml}-N_l}{N_l}\right\} \quad (6)$$

که در این رابطه، mak(i) زمان پروژه‌ی مربوط به راه حل i می‌باشد، max_mak(P) بیشترین زمان پروژه‌ی مربوط به افراد جمعیت جاری می‌باشد، min_CP مسیر بحرانی پروژه است که با توجه به حداقل زمان هر یک از فعالیت‌ها محاسبه می‌شود و ERR(μ) درجه‌ی نشدنی بودن راه حل i را نمایش می‌دهد. شایان ذکر است که ERR(μ) با توجه به رابطه‌ی (٦) محاسبه می‌شود.

لوا و همکاران (۲۰۰۹) اثبات کردند که در شرایط یکسان محاسباتی، تابع تناسب پیشنهادی ایشان، در مقابل سایر توابع تناسب ادبیات موضوع، انحراف متوسط بهتری دارد [7]. به هر جهت، واضح است که با توجه به محاسبه‌ی مسیر بحرانی شبکه‌ی پروژه در تابع تناسب لوا و همکاران (۲۰۰۹)، زمان محاسبات برنامه افزایش خواهد یافت. لذا، در این پژوهش، تابع تناسب زیر (معادله‌ی ۷) جهت رفع این نقص ارائه می‌شود.

$$f(I)=\begin{cases}1-\dfrac{T-mak(I)}{T}, & \text{if } ERR(\mu)=0\\ 1+\dfrac{mak(I)}{T}+ERR(\mu), & \text{otherwise}\end{cases} \quad (7)$$

که در این رابطه، T جمع بیشترین زمان همه‌ی فعالیت‌هاست و سایر پارامترها همانند رابطه‌ی (۵) می‌باشند. انتظار می‌رود که زمان محاسبات مربوط به تابع تناسب پیشنهادی نسبت به تابع تناسب لوا و همکاران (۲۰۰۹) کمتر باشد؛ چرا که از طرفی تعداد محاسبات تابع تناسب پیشنهادی یکی کمتر از تابع تناسب لوا و همکاران می‌باشد و از طرف دیگر زمان محاسبات min_CP بیشتر از T می‌باشد.

در ادامه‌ی این بخش از انحراف متوسط و زمان محاسبات برنامه برای اثبات برتری تابع تناسب پیشنهادی استفاده می‌شود. برای این منظور نمونه‌های استاندارد J10، J12، J14، J16، J18 و J20 از کتابخانه‌ی مسائل زمان‌بندی پروژه‌ها انتخاب شده‌اند. معیار توقف لحاظ شده، ۵۰۰۰ زمان‌بندی تولیدی می‌باشد.

همان‌طور که انتظار می‌رفت و جدول (۱) نیز نشان می‌دهد، زمان اجرای برنامه با استفاده از تابع تناسب پیشنهادی کوچک‌تر و یا مساوی، نسبت به زمانی است که از تابع تناسب لوا و همکاران استفاده می‌شود. به‌علاوه انحراف متوسط‌های به‌دست آمده نشان می‌دهد که در همه‌ی موارد (به‌جز J16) تابع تناسب پیشنهادی این پژوهش، عملکرد بهتری نسبت به تابع تناسب لوا و همکاران (۲۰۰۹) و در نتیجه، عملکرد بهتری نسبت به همه‌ی توابع تناسب پیشنهادی در ادبیات موضوع دارد.

جدول ۱ عملکرد توابع تناسب (معیار توقف لحاظ شده ۵۰۰۰ زمان‌بندی تولیدی می‌باشد)

	تابع تناسب	J20	J18	J16	J14	J12	J10
انحراف متوسط (%)	پژوهش حاضر	۰/٦٦	۰/٤٨	۰/۳۸	۰/۳۰	۰/۱۷	۰/۰٦
	لوا و همکاران	۰/٦۷	۰/٤٨	۰/۳۷	۰/۳۰	۰/۱۷	۰/۰٦
نرخ بهینه (%)	پژوهش حاضر	٦٤	۷۰	۷۲	۷۸	۸۷	۹۵
	لوا و همکاران	٦٤	۷۰	۷۲	۷۸	۸۷	۹۵
زمان اجرا (ثانیه)	پژوهش حاضر	۰/۱۷	۰/١٦	۰/۱۵	۰/١٤	۰/۱۱	۰/۰۷
	لوا و همکاران	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/١٦	۰/١٤	۰/۱۱	۰/۰٦

روش تولید زمان‌بندی (فرآیند رمزگشایی)

روش تولید زمان‌بندی یک روش مؤثر برای تبدیل یک راه حل RCPSP به زمان‌بندی می‌باشد. در ادبیات موضوع، دو نوع روش تولید زمان‌بندی وجود دارد: روش تولید زمان‌بندی سری و روش تولید زمان‌بندی موازی.

از آن‌جا که کولیش اثبات نمود که با استفاده از روش تولید زمان‌بندی موازی، گاهی اوقات رسیدن به جواب بهینه غیرممکن است، در این پژوهش از روش تولید زمان‌بندی سری استفاده می‌شود [17]. در MRCPSP به‌دلیل وجود منابع تجدیدناپذیر، روش تولید زمان‌بندی سری بایستی اصلاح شود. در واقع، دو مسأله‌ی مهم بایستی در نظر گرفته شوند: نخست، تبدیل راه حل‌های نشدنی به شدنی تا جایی که ممکن باشد و دوم، استفاده کامل از منابع تجدیدناپذیر در راه حل‌های شدنی. به‌منظور پیاده‌سازی این دو هدف، از فرآیند مقابله با راه حل‌های شدنی و نشدنی کمک گرفته می‌شود. این فرآیندها روش تولید زمان‌بندی سری را به روش تولید زمان‌بندی سری چندحالته (MSSGS) گسترش می‌دهند.

فرآیند مقابله با راه حل‌های نشدنی. در مواجهه با راه حل‌های نشدنی، بهترین تکنیک کاربرد فرآیند ترمیم برای بهبود برخی از آنها می‌باشد [13]. از این‌رو، در این مقاله بعد از تولید جمعیت اولیه، فرآیند مقابله با راه حل‌های نشدنی برای تبدیل راه حل‌های نشدنی به شدنی آغاز می‌شود. این فرآیند به هر کدام از راه حل‌های نشدنی به‌طور جداگانه اعمال می‌شود. در این فرآیند یک فعالیت به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود و حالت اجرایی آن به حالت اجرایی جدیدی تغییر می‌یابد؛ اگر با این تغییر ERR کاهش یافت، حالت اجرایی جدید جایگزین قبلی می‌شود. این فرآیند تا زمانی که به یک مقدار مشخص از پیش تعیین‌شده برسیم ادامه می‌یابد. پس از انجام فرآیند عنوان‌شده، فقط راه‌حل‌های شدنی اجازه‌ی ورود به تکرار پیش‌رو– پس‌روی چندحالته را (MM-FBI) (که در ادامه توصیف می‌شود) خواهند داشت. فرآیند مقابله با راه حل‌های شدنی در MM-FBI شرح داده خواهد شد.

فرآیند تکرار پیش‌رو- پس‌روی چند حالته (MM-FBI). در RCPSP تکرار پیش‌رو–پس‌رو (FBI) یک تکنیک مؤثر برای بهبود کیفیت راه حل‌ها می‌باشد [18]. این ایده، به‌وسیله‌ی لوا و همکاران (۲۰۰۹) برای MRCPSP به نام فرآیند تکرار پیش‌رو- پس‌روی چندحالته (MM-FBI) گسترش یافت [7]. این روش با استفاده از فرآیند بهبود حالت اجرایی، زمان پایان هر فعالیت را در هر نقطه‌ی تصمیم از زمان‌بندی جزئی، بدون تغییر حالات اجرایی و تأخیر سایر فعالیت‌ها، کاهش می‌دهد [11].

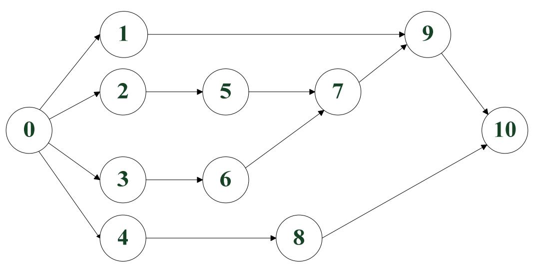
نقطه‌ضعف فرآیند MM-FBI این است که فعالیت‌هایی که زودتر زمان‌بندی می‌شوند شانس بیشتری برای استفاده از منابع تجدیدناپذیر دارند. برای غلبه بر این نقطه‌ضعف، در ادبیات موضوع فرآیند بهبود حالت اجرایی به‌طور تصادفی فقط به برخی از فعالیت‌ها اعمال می‌شود. در این فرآیند ابتدا برای تک‌تک فعالیت‌های یک راه حل یک عدد تصادفی بین صفر و یک تولید می‌شود. اگر عدد تصادفی مربوط به هر فعالیت از یک مرز (SGS_Pper که معمولاً ۰/۷ در نظر گرفته می‌شود) کمتر شود فرآیند بهبود حالت اجرایی به آن فعالیت اعمال می‌شود. بدین ترتیب به ۷۰ درصد فعالیت‌ها (در SGS_Pper=0.7) این فرآیند اعمال خواهد شد. برای روشن‌تر شدن مسأله به مثال زیر توجه نمایید.

برای مثال یک پروژه با یازده فعالیت (شامل دو فعالیت مجازی)، یک نوع منبع تجدیدپذیر و یک نوع منبع تجدیدناپذیر را در نظر بگیرید. در این پروژه هر فعالیت دو حالت اجرایی دارد. فعالیت‌های شروع و پایان، فعالیت‌های مجازی با یک حالت اجرایی، زمان صفر و بدون احتیاج به منابع می‌باشند. در پروژه‌ی مذکور موجودیت منابع تجدیدپذیر و ناپذیر به‌ترتیب ۲

و ۲۸ می‌باشد. اطلاعات تکمیلی و محدودیت‌های پیش‌نیازی این پروژه به‌ترتیب در جدول (۲) و شکل (۱) قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۲ اطلاعات فعالیت‌های پروژه مثال MRCPSP

شماره فعالیت	حالت اجرایی ۱			حالت اجرایی ۲		
	d3j	nj3l	rj3k	d2j	nj2l	rj2k
۱	۲	٤	۲	۳	۲	۱
۲	۲	۵	۱	٤	۲	۱
۳	۲	۳	۱	۳	۱	۱
٤	۱	۲	۱	۲	۱	۱
۵	۲	۵	۲	٤	۳	۲
٦	۲	٤	۱	۳	۳	۱
۷	۱	۲	۲	۲	۱	۲
۸	۱	۳	۲	۳	۲	۱
۹	٤	۳	۱	٦	۱	۱



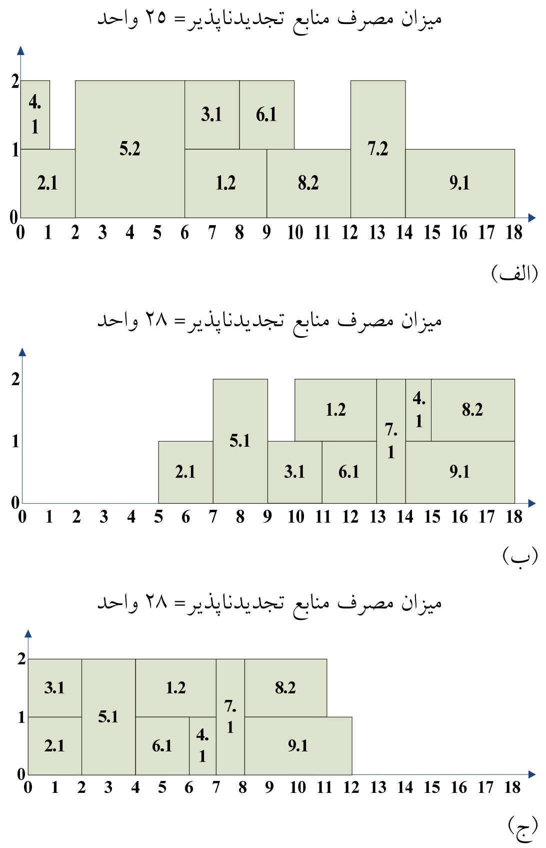
شکل ۱ شبکه پروژه برای مثال MRCPSP

در این قسمت پژوهش، یک گام از MM-FBI پیاده‌سازی می‌شود. فرض کنید که لیست اولویت فعالیت‌ها (λ) و لیست حالات اجرایی (μ) یک راه حل شدنی برای پروژه‌ی فوق‌الذکر مطابق زیر باشد.

λ= (۰,۰/٦۵,۰/۹,۰/۵۵,۰/۸,۰/۷۵,۰/۵,۰/٤,۰/٤۵,۰/۳۵,۰)

μ= (۱, ۱, ۱, ۲, ۲, ۱, ۱, ۲, ۲, ۱, ۱)

گراف منابع مربوط به راه حل بالا، با استفاده از فرآیند SSGS در شکل «۲-الف» نمایش داده شده است (۳,۱ به‌معنای فعالیت ۳ با حالت اجرایی ۱ می‌باشد). MM-FBI با زمان‌بندی پس‌رو روی زمان‌بندی موجود آغاز می‌شود. برای این منظور، زمان پایان فعالیت‌ها در زمان‌بندی موجود به‌عنوان اولویت فعالیت‌ها در نظر گرفته می‌شود و فرآیند بهبود حالت اجرایی در طی تولید این زمان‌بندی اعمال می‌شود. فرض کنید که در راه حل بالا، فعالیت‌های ۵ و ۷ به‌طور تصادفی برای اعمال فرآیند بهبود حالت اجرایی در زمان‌بندی پس‌رو انتخاب می‌شوند. همان‌طور که در شکل «۲- ب» مشاهده می‌شود، فرآیند بهبود حالت اجرایی زمان انجام فعالیت ۵ را دو روز و زمان انجام فعالیت ۷ را یک روز کاهش می‌دهد. با این تغییرات میزان مصرف منبع تجدیدناپذیر از ۲۵ به ۲۸ (یعنی موجودیت منبع تجدیدناپذیر) افزایش می‌یابد.



شکل ۲ یک تکرار MM-FBI و میزان مصرف منبع تجدیدناپذیر (NRC)؛ الف) زمان‌بندی موجود، ب) زمان‌بندی پس‌رو، ج) زمان‌بندی پیش‌رو

یک تکرار MM-FBI با زمان‌بندی پیش‌رو تکمیل می‌شود. برای زمان‌بندی پیش‌رو، زمان آغاز فعالیت‌ها در زمان‌بندی پس‌رو، به‌عنوان اولویت فعالیت‌ها در نظر گرفته می‌شود. اگر موجودیت منبع تجدیدناپذیر به‌طور کامل استفاده نشده باشد، فرآیند بهبود حالت اجرایی در این جهت نیز اعمال می‌شود. در این مثال، چون موجودیت منبع تجدیدناپذیر، در فرآیند پس‌روی بالا به‌طور کامل استفاده شده‌است، فرآیند بهبود حالت اجرایی در فرآیند پیش‌رو اعمال نمی‌شود. پس از اتمام یک تکرار فرآیند MM-FBI زمان پروژه‌ی مثال فوق از ۱۸ به ۱۲ کاهش می‌یابد (شکل «۲-ج» را ببینید). شایان ذکر است که کارایی روش MM-FBI در کاهش زمان پروژه، توسط لوا و همکاران به اثبات رسیده است [7].

نتایج به‌دست آمده از الگوریتم FIPS پیشنهادی

در این بخش با استفاده از نتایج حاصل، عملکرد الگوریتم FIPS پیشنهادی برای حل MRCPSP مورد بررسی قرار می‌گیرد. الگوریتم FIPS پیشنهادی با استفاده از برنامه‌ی مطلب کدنویسی شد و آزمایش‌ها با معیار توقف ۵۰۰۰ زمان‌بندی تولیدی، بر روی کامپیوتر T9300 (پردازشگر ۲,۵ گیگا هرتز) صورت پذیرفت.

مجموعه‌های مشهور و پایه‌ی J10، J12، J14، J16، J18 و J20 که در سایت http://129.187.106.231/psplib/ موجود می‌باشند، برای آزمایش الگوریتم FIPS پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفتند. این مجموعه‌ها، به‌ترتیب شامل ۱۰، ۱۲، ۱٤، ١٦، ۱۸، و ۲۰ فعالیت غیرمجازی می‌باشند. هرکدام از این مجموعه‌ها ٦٤۰ نمونه دارند که برخی از آنها نشدنی می‌باشند. بنابراین، آنها از آزمایش‌های این پژوهش حذف شدند. ستون دوم جدول (۳) تعداد راه حل‌های شدنی هر مجموعه را نشان می‌دهد. در هر نمونه، یک فعالیت می‌تواند در یکی از سه حالت اجرایی تعریف‌شده با زمان مشخصی بین ۱ تا ۱۰ واحد زمانی به اجرا درآید. هر نمونه شامل دو نوع منبع تجدیدپذیر و دو نوع منبع تجدیدناپذیر می‌باشد. برای همه‌ی مجموعه‌های عنوان شده، زمان بهینه‌ی نمونه‌های شدنی شناخته شده‌اند.

جدول ۳ نتایج آماری الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای حل مجموعه مسایل پایه (۵۰۰۰ زمان‌بندی تولید شده به‌عنوان معیار توقف لحاظ شده‌است)

مجموعه‌های پایه	راه حل‌های شدنی	انحراف متوسط (٪)	نرخ بهینه (٪)	زمان اجرای برنامه (ثانیه)
J10	٥٣٦	۰/۰٦	۹٥	۰/۰۷
J12	٥٤٧	۰/۱۷	۸۷	۰/۱۱
J14	٥٥۱	۰/۳۰	۷۸	۰/۱٤
J16	٥٥۰	۰/۳۸	۷۲	۰/۱٥
J18	٥٥۲	۰/٤۸	۷۰	۰/۱٦
J20	٥٥٤	۰/٦٦	٦٤	۰/۱۷

تنظیم پارامترها

بعد از انجام چند آزمایش، اندازه‌ی جمعیت اولیه 2J در نظر گرفته شد. سایر پارامترهای PSO مطابق آن‌چه در فرآیندهای PSO و FIPS توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته بودند، تنظیم شدند. بر این اساس، در ممان اینرسی کاهنده، وزن اولیه ۰/۹ و وزن نهایی ۰/٤ لحاظ شد. φ، 1/4در نظر گرفته شد. مقدار SGS_Pper نیز ۰/۷ لحاظ شد.

مقایسه با سایر الگوریتم‌های موجود

نتایج آماری الگوریتم پیشنهادی در جدول (۳) نمایش داده شده‌است. انحراف متوسط از زمان بهینه، نرخ بهینه (درصد تعداد راه حل‌هایی که دقیقاً به جواب بهینه دست یافته‌اند) و زمان اجرای برنامه برای تولید یک زمان‌بندی (به ثانیه) برای مقایسه استفاده شده‌اند. برای مجموعه‌های J10-J20 مقادیر بهینه‌ی موجود در

کتابخانه‌ی مسائل زمان‌بندی پروژه‌ها به‌عنوان پایه‌ای برای محاسبه‌ی انحراف متوسط در نظر گرفته شده‌اند.

براساس ملاحظات عنوان‌شده، الگوریتم پیشنهادی، با بهترین الگوریتم‌های موجود در زمینه‌ی MRCPSP نظیر الگوریتم ژنتیک و سیستم هوش مصنوعی پتگهم و ون‌هوک (۲۰۱۰ و ۲۰۰۹) که به‌ترتیب با VPVGA و VPVAIS نمایش داده می‌شوند [9]، [8]، EDA و SFLA ارائه‌شده به‌وسیله‌ی وانگ و فانگ (۲۰۱۲ و ۲۰۱۱) که به‌ترتیب با LCEDA و LCSFLA نمایش داده می‌شوند [12]، [11]، الگوریتم ژنتیک ترکیبی لوا و همکاران (۲۰۰۹) که با LHGA نمایش داده می‌شود [7]، الگوریتم تکاملی ترکیبی الومی و فرتمپس (۲۰۱۰) که با EFEA نمایش داده می‌شود [10]، جستجوی ترکیبی پراکنده‌ی رنجبر و همکاران (۲۰۰۹) که با RSS نمایش داده می‌شود [19]، الگوریتم ژنتیک ارائه‌شده توسط آلکارز و همکاران (۲۰۰۳) که با AGA نمایش داده می‌شود [20] و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید جوزفسکا و همکاران (۲۰۰۱) که با JSA نمایش داده می‌شود [5]، مقایسه شده‌است.

مقایسه‌ی مربوط به انحراف از متوسط در جدول (٤) انجام شده‌است. در این جدول، الگوریتم‌ها با توجه به عملکردشان رتبه‌بندی شده‌اند. همان‌طور که در جدول (٤) دیده می‌شود FIPS پیشنهادی درJ10 و J14 رتبه‌ی سوم و در J12 رتبه‌ی چهارم را دارا می‌باشد و در مجموعه‌های J16 تا J20 بعد از VPVGA بهترین عملکرد را دارد. این مسأله نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی با افزایش پیچیدگی مسأله عملکرد بهتری از خود نمایش می‌دهد.

در جدول (٥) زمان اجرای برنامه برای تولید یک زمان‌بندی (CPU-time) در الگوریتم FIPS با مقدار مشابه سایر الگوریتم‌ها مقایسه شده‌است. در مجموعه‌ی J10، CPU-time الگوریتم FIPS بهترین است و در سایر مجموعه‌ها بعد از LHGA بهترین می‌باشد (البته به‌جز J12). دلیل برتری LHGA استفاده از کامپیوتری با قدرت پردازش بالاتر می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سرعت FIPS مناسب و قابل قبول می‌باشد.

جدول ٤ انحراف متوسط از راه حل بهینه (۵۰۰۰ زمان‌بندی تولیدشده به‌عنوان معیار توقف لحاظ شده‌است)

الگوریتم	J20	J18	J16	J14	J12	J10
VPVGA	۰/۵۷	۰/٤۲	۰/۳۲	۰/۲۲	۰/۰۹	۰/۰۱
الگوریتم FIPS پژوهش حاضر	۰/٦٦	۰/٤۸	۰/۳۸	۰/۳۰	۰/۱۷	۰/۰٦
VPVAIS	۰/۷۰	۰/۵۲	۰/۳۹	۰/۲۰	۰/۰۷	۰/۰۲
LHGA	۰/۸۷	۰/٦۳	۰/٤٤	۰/۳۲	۰/۱۷	۰/۰٦
LCEDA	۱/۲۸	۰/۹۰	۰/۵۹	۰/٤۳	۰/۱٤	۰/۱۲
LCSFLA	۱/٤۰	۰/۹٤	۰/۵۸	۰/٤٦	۰/۲۱	۰/۱۰
EFEA	۱/٦۲	۱/۳۰	۰/۹۱	۰/۷۷	۰/۲٤	۰/۱٤
RSS	۱/٦٤	۱/۲۱	۰/۹۵	۰/۸۹	۰/٦۵	۰/۱۸
AGA	۱/۹۱	۱/٤۳	۱/۱۲	۱/۰۰	۰/۷۳	۰/۲٤
JSA	٦/۷٤	۵/۵۲	٤/۰۷	۲/٦۰	۱/۷۳	۱/۱٦

جدول ۵ مقایسه با سایر الگوریتم‌های پیشنهادی، معیار مقایسه= زمان اجرای برنامه (۵۰۰۰ زمان‌بندی تولید شده به‌عنوان معیار توقف لحاظ شده‌است)

الگوریتم	J20	J18	J16	J14	J12	J10
الگوریتم FIPS پژوهش حاضر[a]	۰/۱۷	۰/۱٦	۰/۱۵	۰/۱٤	۰/۱۱	۰/۰۷
VPVGA[b]	۰/۱۷	۰/۱٦	۰/۱۵	۰/۱٤	۰/۱۳	۰/۱۲
LHGA[c]	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۰۸
LCSFLA[d]	۰/۲۷	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۰۷
[a] T9300 2.5 GHz. [b] Pentium 2.80 GHz. [c] Pentium 3GHz. [d] T7500 2.2 GHz.						

جدول ٦ مقایسه با سایر الگوریتم‌های پیشنهادی، معیار مقایسه: نرخ بهینه (۵۰۰۰ زمان‌بندی تولیدشده به‌عنوان معیار توقف لحاظ شده‌است)

الگوریتم	J20	J18	J16	J14	J12	J10
VPVGA	۸۵/۷٤	۸۸/۹۵	۹۲/۰۰	۹٤/۵٦	۹۸/۱۷	۹۹/٦۳
LHGA	۸۰/۳۲	۸٤/۹٦	۹۰/۰۰	۹۲/۹۲	۹٦/۵۳	۹۸/۵۱
LCSFLA	۷۲/۸٤	۷۹/٤٤	۸٦/٤۹	۹۰/۸٦	۹۵/۹۸	۹۷/۹۳
الگوریتم FIPS پژوهش حاضر	٦٤	۷۰	۷۲	۷۸	۸۷	۹۵
JSA	۳۵/۷۰	٤۳/۵۰	۵٤/۷۰	٦٦/٤۰	۸۰/۳۰	۸۵/٦۰

با توجه به قیاس نرخ بهینه در جدول (٦) الگوریتم پیشنهادی FIPS نسبت به سایر الگوریتم‌ها مناسب نمی‌باشد. اما نتایج این الگوریتم نشان می‌دهد که بیشتر راه حل‌های یافت‌شده نزدیک به راه حل بهینه می‌باشند. برای مثال الگوریتم پیشنهادی روی همه‌ی مسائل J10 به‌خوبی عمل کرده‌است. هم‌چنین، این الگوریتم روی ۹۸٪ مسائل J12، ۹٦% مسائل J16 و J14، ۹٤% مسائل J18 و ۹۰٪ مسائل J20 خوب عمل کرده‌است. در پایان، با توجه به مقایسه‌های صورت گرفته، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم FIPS پیشنهادی بسیار کارآمد می‌باشد.

مطالعه‌ی موردی

در این بخش، زمان‌بندی یک پروژه‌ی عمرانی (یک ساختمان مسکونی دوطبقه) با استفاده از الگوریتم ارائه‌شده در این پژوهش انجام می‌شود. در این پروژه برای هر فعالیت حداکثر سه حالت اجرایی در نظر گرفته شده‌است. ساختار شکست کار، زمان و منابع مورد نیاز برای هر یک از حالت‌های اجرایی مربوط به هر فعالیت در جدول (۷) مشخص گردیده‌است. در این جدول d مدت زمان با واحد روز، r_1 تعداد کارگر به نفر، r_2 تعداد استاد کار به نفر و n هزینه‌ی استاد کار به میلیون ریال می‌باشد. روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها نیز در جدول (۸) مشخص گردیده‌است. در این مطالعه موردی شرایط زیر حاکم است:

۱- پروژه توسط یک شرکت پیمانکاری انجام خواهد شد که برای اجرای پروژه‌های خود، ده کارگر ساده استخدام نموده‌است و فرض بر این است که کارگر دیگری جذب نمی‌کند (کارگران ساده در هر صورت حقوق ماهیانه خود را دریافت می‌نمایند لذا بایستی حداکثر استفاده از ایشان صورت پذیرد).

۲- کارگران ماهر (استادکار) جزء نیروهای شرکت نیستند و بسته به نیاز فعالیت‌ها به‌صورت روزمزد به‌کار گرفته می‌شوند (دستمزد هر یک از ایشان به‌طور متوسط ۱,۰۰۰,۰۰۰ ریال نفر-روز می‌باشد).

۳- در این پروژه بودجه‌ی کل در نظر گرفته شده برای استادکاران ۵۱۵,۰۰۰,۰۰۰ ریال می‌باشد.

جدول ۷ اطلاعات فعالیت‌های پروژه‌ی عمرانی مطالعه‌ی موردی

فعالیت‌ها	شماره‌ی فعالیت‌ها	حالت اجرایی ۱				حالت اجرایی ۲				حالت اجرایی ۳			
		n	r_2	r_1	d	n	r_2	r_1	d	n	r_2	r_1	d
خاک‌برداری و تسطیح	۱	۱	۱	۳	۱	–	–	–	–	–	–	–	–
پی‌کنی	۲	۳	۱	۳	۳	–	–	–	–	–	–	–	–
بتن مگر	۳	۱	۱	۲	۱	–	–	–	–	–	–	–	–
قالب‌بندی فونداسیون	٤	۲۰	۲	۲	۱۰	۸	۲	٤	٤	۹	۳	۸	۳
آرماتوربندی فونداسیون	٥	٦۰	٥	۳	۱۲	۲۸	۷	۸	٤	۲۱	۷	۱۰	۳
بتن‌ریزی فونداسیون	٦	۸	٤	٤	۲	۸	۲	۲	٤	۱۲	۲	۲	٦
عمل‌آوری بتن فونداسیون	۷	۰	۰	۰	۳	–	–	–	–	–	–	–	–
آرماتوربندی ستون‌های طبقات	۲٦و۱۷،۸	٥	۱	۲	٥	٤	۲	٤	۲	۸	۱	۱	۸
قالب‌بندی ستون‌های طبقات	۲۷و۱۸،۹	۳	۱	۱	۳	۲	۱	۲	۲	۱	۱	۳	۱
بتن‌ریزی ستون‌های طبقات	۲۸و۱۹،۱۰	۲	۱	٤	۲	۳	۱	۲	۳	٥	۱	۱	٥
عمل‌آوری بتن ستون طبقات	۲۹و۲۰،۱۱	۰	۰	۰	۳	–	–	–	–	–	–	–	–
قالب‌بندی سقف طبقات	۳۰و۲۱،۱۲	۱٤	۲	۳	۷	۹	۳	٦	۳	٦	۳	۷	۲
آرماتوربندی سقف طبقات	۳۱و۲۲،۱۳	۱٤	۲	۳	۷	۹	۳	٥	۳	٦	۳	٦	۲
بتن‌ریزی سقف طبقات	۳۲و۲۳،۱٤	۳	۳	٥	۱	٦	۳	٤	۲	۹	۳	٥	۳
عمل‌آوری بتن سقف طبقات	۳۳و۲٤،۱٥	۰	۰	۰	۳	–	–	–	–	–	–	–	–
حضور پایه‌های اطمینان	۳٤و۲٥،۱٦	۰	۰	۰	۱٤	–	–	–	–	–	–	–	–
دیوارچینی طبقه‌ی همکف (پارکینگ)	۳٥	٦	۲	٥	۳	۲	۲	۷	۱	۱۰	۲	۲	٥
دیوارچینی طبقه‌ی اول- طبقه‌ی دوم	۳۷و۳٦	٥	۱	٤	٥	۲	۲	۷	۱	۱۰	۲	۲	٥
نصب چارچوب‌های طبقه‌ی همکف (پارکینگ)-اول-دوم	٤۰و۳۹،۳۸	۳	۱	۱	۳	۲	۱	۲	۲	۱	۱	۳	۱
شیب‌بندی بام	٤۱	٥	۱	۳	٥	٤	۲	٦	۲	٤	۱	٤	٤
عمل‌آوری بام	٤۲	۰	۰	۰	۳	–	–	–	–	–	–	–	–
عایق‌کاری بام	٤۳	۳	۱	۲	۳	۱	۱	۳	۱	٤	۱	۱	٤
لوله‌کشی تأسیسات مکانیکی طبقه‌ی همکف -اول-دوم	٤٦و٤٤،٤٥	۷	۱	۲	۷	۳	۱	٦	۳	۲	۱	۷	۲
کانال‌کشی‌کولر طبقه‌ی اول-طبقه‌ی دوم	٤۸و٤۷	۱۰	۱	۳	۱۰	۱۰	۲	٦	٥	٦	۳	۱	۲
لوله‌کشی برق طبقه‌ی همکف- طبقه‌ی اول- طبقه‌ی دوم	٥۱و٤۹،٥۰	۸	۲	۲	٤	٦	۳	٤	۲	۳	۳	٥	۱
سیم‌کشی برق طبقه‌ی همکف- طبقه‌ی اول- طبقه‌ی دوم	٥٤و٥۳،٥۲	۱۰	۱	۲	۱۰	۱۰	۲	٤	٥	٦	۳	٦	۲
کف‌سازی کف طبقات (طبقه‌ی همکف- اول- دوم)	٥۷و٥٦،٥٥	٤	۱	۲	٤	٥	۱	۱	٥	۳	۱	۱	۳
عایق‌کاری سرویس‌های بهداشتی طبقه‌ی اول- طبقه‌ی دوم	٥۹و٥۸	٤	۱	۱	٤	٤	۲	۲	۲	۳	۳	٤	۱
کف‌سازی بام	٦۰	۱۲	۱	۱	۱۲	۱۲	۲	۲	٦	۸	۲	۳	٤
سقف کاذب ورابیتس‌بندی طبقه‌ی همکف- طبقه‌ی اول- طبقه‌ی دوم	٦۳و٦۲،٦۱	٥	۱	۱	٥	۲	۱	۲	۲	۳	۳	٥	۱
گچ و خاک و قرنیز طبقه‌ی همکف- طبقه‌ی اول- طبقه‌ی دوم	٦٦و٦٤،٦٥	۳	۱	۱	۳	۲	۲	۳	۱	۲	۱	۲	۲
نصب پنجره‌ها و نرده‌ها طبقه‌ی همکف- طبقه‌ی اول- طبقه‌ی دوم	٦۹و٦۷،٦۸	۱۰	۲	۲	٥	٦	۳	٦	۲	٥	٥	۱۰	۱
کاشی‌کاری، سرامیک و نصب کاسه‌ی توالت طبقه‌ی اول	۷۰	۱۰	۲	٥	٥	۸	٤	۱۰	۲	۹	۳	۸	۳
کاشی‌کاری، سرامیک و نصب کاسه‌ی توالت طبقه‌ی دوم	۷۱	۱۰	۲	٥	٥	۸	٤	۱۰	۲	۱۰	۲	۱	۱۰
نازک‌کاری پله‌ها (سنگ‌کاری،	۷۲	۳۰	۲	٤	۱٥	۲۰	٤	۸	۷	۱۸	٦	۱۰	۳

سفیدکاری و ...)													
سفیدکاری طبقه‌ی همکف- طبقه‌ی اول- طبقه‌ی دوم	۷۵و ۷۳،۷٤	٦	۱	۱	٦	٦	۲	۲	۳	٤	۲	۳	۲
سیمان‌کاری طبقه‌ی همکف	۷٦	۱۰	۱	۳	۱۰	۱۰	۲	٦	٥	٦	۳	۱۰	۲
نصب درب‌های چوبی و فلزی طبقه‌ی همکف- طبقه‌ی اول- طبقه دوم	۷۹و ۷۸،۷۷	۱۰	۱	۳	۱۰	۱۰	۲	٦	٥	٦	۳	۱۰	۲
نصب شیشه‌ها	۸۰	٥	۱	۲	٥	٤	۲	٤	۲	۲	۲	٥	۱
نقاشی طبقه‌ی همکف	۸۱	۸	۲	۳	٤	۸	۱	۱	۸	٦	۳	٥	۲
نقاشی طبقه‌ی اول- طبقه‌ی دوم	۸۳و ۸۲	۱٤	۲	۲	۷	۱۰	۱	۱	۱۰	۱۲	۳	٥	٤
ساخت و نصب کابینت	۸٤	٤۰	۲	۳	۲۰	٤٥	۳	٥	۱٥	٦۰	٦	۹	۱۰
نصب شیر آلات و لوازم بهداشتی	۸٥	٦	۲	٤	۳	٤	۲	٥	۲	٤	۱	۳	٤
آهن‌کشی آسانسور	۸٦	۱۲	۲	۳	٦	۱٥	۳	٥	٥	۱٦	٤	۱۰	٤
نصب ریل و کابین و راه‌اندازی آسانسور	۸۷	۸	۲	۳	٤	۹	۳	٥	۳	۸	٤	٦	۲
نصب کلید و پریز و لامپ و تابلوی برق و سایر لوازم برقی	۸۸	۱۰	۲	۳	٥	۱۲	٤	٦	۳	۸	۲	٤	٤
نماسازی خارجی	۸۹	٦۰	۳	٥	۲۰	۷٥	٥	۷	۱٥	٥۰	٥	۸	۱۰
رفع نواقص، نظافت	۹۰	۰	۰	٥	۳	۰	۰	۷	۲	۰	۰	۱۰	۱

جدول ۸ روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌های پروژه‌ی عمرانی مطالعه‌ی موردی

شماره‌ی فعالیت	پیش‌نیاز	شماره‌ی فعالیت	پیش‌نیاز	شماره‌ی فعالیت	پیش‌نیاز	شماره‌ی فعالیت	پیش‌نیاز
۱	–	۲٤	۲۳	٤۷	۳٦	۷۰	٦۸ و ٥۸
۲	۱	۲٥	۲۳	٤۸	۳۷	۷۱	٦۹ و ٥۹
۳	۲	۲٦	۲٤	٤۹	۳٥	۷۲	۷۱
٤	۳	۲۷	۲٦	٥۰	۳٦	۷۳	٦٤
٥	٤	۲۸	۲۷	٥۱	۳۷	۷٤	٦٥
٦	٥	۲۹	۲۸	٥۲	٤۹	۷٥	٦٦
۷	٦	۳۰	۲۹	٥۳	٥۰	۷٦	٥٥
۸	۷	۳۱	۳۰	٥٤	٥۱	۷۷	۷۳ و ۳۸
۹	۸	۳۲	۳۱	٥٥	٥۲و ٤٤	۷۸	۷٤ و ۳۹
۱۰	۹	۳۳	۳۲	٥٦	٥۳و ٤۷،٤٥	۷۹	۷٥ و ٤۰
۱۱	۱۰	۳٤	۳۲	٥۷	٥٤و ٤۸،٤٦	۸۰	۷٥ و ۷۳،۷٤
۱۲	۱۱	۳٥	۱٦	٥۸	٥٦	۸۱	۷۳
۱۳	۱۲	۳٦	۲٥	٥۹	٥۷	۸۲	۷٤
۱٤	۱۳	۳۷	۳٤	٦۰	٤٦ و ٤۱	۸۳	۷٥
۱٥	۱٤	۳۸	۱٦	٦۱	٦٤	۸٤	۷٥ و ۷۳،۷٤
۱٦	۱٤	۳۹	۲٥	٦۲	٦٥	۸٥	۷٥ و ۷۳،۷٤
۱۷	۱٥	٤۰	۳٤	٦۳	٦٦	۸٦	٦٦ و ٦٥،٦٤
۱۸	۱۷	٤۱	۳۳	٦٤	٥٥	۸۷	۸٦
۱۹	۱۸	٤۲	٤۱	٦٥	٥٦	۸۸	۸۳ و ۸۲،۸۱
۲۰	۱۹	٤۳	٦۰ و ٤۲	٦٦	٥۷	۸۹	۸۸
۲۱	۲۰	٤٤	۳٥	٦۷	٦۱	۹۰	۸۹
۲۲	۲۱	٤٥	۳٦	٦۸	٦۲		
۲۳	۲۲	٤٦	۳۷	٦۹	٦۳		

در مورد مصالح، با توجه به این‌که تمامیِ حالت‌های اجراییِ یک فعالیت، میزانِ مصالحِ مصرفیِ یکسانی دارند این موضوع در جواب بهینه تأثیرگذار نخواهد بود و به همین دلیل در نظر گرفته نشده‌است. با توجه به فرضیات و محدودیت‌های فوق، الگوریتم ارائه‌شده در این پژوهش، فعالیت‌های پروژه را به‌گونه‌ای زمان‌بندی

می‌نماید که زمان پروژه حداقل گردد. لذا، خروجیِ این الگوریتم شامل موارد زیر است:
الف) انتخاب یک حالت اجرایی مناسب برای هر فعالیت (برای این منظور بایستی از حداکثر بودجه‌ی کارگران ماهر استفاده گردد تا زمان پروژه حداقل شود)
ب) اولویت‌بندی برای تخصیص منابع کارگری ساده (در صورتی‌که اجرای هم‌زمان فعالیت‌ها با توجه به محدودیت‌های پیش‌نیازی امکان‌پذیر باشد)، این اولویت‌بندی به‌گونه‌ای صورت می‌پذیرد تا زمان پروژه حداقل گردد. برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه‌ی مطالعه‌ی موردی فوق، با استفاده از الگوریتم ارائه‌شده‌ی این پژوهش محاسبه گردید و خروجی آن در جدول (۹) ارائه شده‌است. در این جدول، زمان شروع هر فعالیت و حالت اجرایی منتخب آن فعالیت نمایش داده شده‌است. با توجه به ردیف آخر جدول (۹)، در برنامه‌ی زمان‌بندی خروجی سعی شده تا از حداکثر ظرفیت منابع پولی استادکاران (۵۱۳,۰۰۰,۰۰۰ ریال از ۵۱۵,۰۰۰,۰۰۰ ریال موجود) استفاده گردد تا زمان پروژه حداقل گردد (زمان حداقل پروژه: ۱۵۱ روز).

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوریتم FIPS کارآمدی برای حل MRCPSP پیشنهاد شد که در آن دو جایگاه برای هر ذره (نماینده‌ی یک راه‌حل MRCPSP) در نظر گرفته شد. جایگاه اول نشان‌دهنده‌ی اولویت فعالیت‌ها برای زمان‌بندی بود و جایگاه دوم لیست حالات اجرایی مرتبط را نمایش می‌داد. برای رمزگشایی نیز، از روش تولید زمان‌بندی سری چندحالته کمک گرفته شد. در این مطالعه هم‌چنین تابع تناسب جدیدی پیشنهاد شد که علاوه بر کاهش زمان محاسبات برنامه، انحراف متوسط را نیز کاهش داد. برای آزمایش الگوریتم پیشنهادی، مجموعه‌های مشهور کتابخانه‌ی مسائل زمان‌بندی پروژه-ها (PSBLIB) مورد استفاده قرار گرفتند. مقایسه‌های انجام‌شده نشان داد که الگوریتم FIPS پیشنهادی بسیار کارآمد می‌باشد.

مراجع

1. Chen, P. and Weng, H., "A two-phase GA model for resource-constrained project scheduling", Automation in Construction, Vol. 28, pp. 485-498, (2009).
2. Zhang, H., "Ant Colony Optimization for Multimode Resource-Constrained Project Scheduling", American Society of Civil Engineers, Vol. 28, pp. 150-159, (2012).
3. Sprecher, A. and Drexl, A., "Solving multi-mode resource-constrained project scheduling problems by a simple, general and powerful sequencing algorithm", *European Journal of Operational Research,* Vol. 107, pp. 431–450, (1998).
4. Glover, F. and Greenberg H.J., "New Approaches for Heuristic Search: A Bilateral Linkage with Artificial Intelligence", European *Journal of Operational Research,* Vol. 39, pp. 119-130, (1989).
5. Jo´ zefowska, J. Mika, M. Rozycki, R. Waligora, G. and Weglarz, J., "Simulated annealing for multi-mode resource-constrained project scheduling", Annals of Operations Research, Vol. 102, pp. 137–155, (2001).
6. Zhang, H. Tom, C.M. and Li, H., "Multimode Project Scheduling Based on Particle Swarm Optimization", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 21, pp. 93– 103, (2006).
7. Lova, A. Tormos, P. Cervantes, M. and Barber, F., "An efficient hybrid genetic algorithm for scheduling projects with resource constraints and multiple execution modes", *International Journal of Production Economics,* Vol. 117 (2), pp. 302– 316, (2009).

8. Peteghme, V.V. and Vanhoucke, M., "An artificial immune system for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem", in: EvoCOP, Springer, Berlin, Tubingen, Germany, pp. 100-107, (2009).
9. Peteghem, V.V. and Vanhoucke, M., "A genetic algorithm for the preemptive and non-preemptive multi-mode resource-constrained project scheduling problem", *European Journal of Operational Research,* Vol. 201, pp. 409–418, (2010).
10. Elloumi, S. and Fortemps, P., "A hybrid rank-based evolutionary algorithm applied to multi-mode resource-constrained project scheduling problem", *European Journal of Operational Research,* Vol. 205, pp. 31–41, (2010).
11. Wang, L. and Fang, C. "An effective shuffled frog-leaping algorithm for multi-mode resource-constrained project scheduling problem", *Information Sciences*, Vol. 181, pp. 4804–4822, (2011).
12. Wang, L. and Fang, C., "An effective estimation of distribution algorithm for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem", *Computers and Operations Research*, Vol. 39, pp. 449–460, (2012).
13. Lee, K. and El-Sharkawi, M., "Modern heuristic optimization techniques", Hoboken, New Jersey, John Wiley and Sons, pp. 50-157, (2008).
14. Damak, N. Jarboui, B. Siarry, P. and Loukil, T., "Differential evolution for solving multi-mode resource constrained project scheduling problems", *Computers and Operations Research*, Vol. 36, pp. 2653-2659, (2009).
15. Mendes, R. Kennedy, J. and Neves, J., "The Fully Informed Particle Swarm: Simpler, Maybe Better", IEEE Transactions on Evolutionary Compution, Vol. 14, pp. 204-210, (2004).
16. Sprecher, A. Hartmann, S. and Drexl, A., "An exact algorithm for project scheduling with multiple modes", OR Spektrum: Organ der Deutschen Gesellschaft fur Operations Research, Vol. 19(3), pp. 195-203, (1997).
17. Kolisch, R., "Serial and parallel resource-constrained project scheduling methods revisited: Theory and computation", *European Journal of Operational Research,* Vol. 43, pp. 23–40, (1996).
18. Tormos, P. and Lova, A., "A competitive heuristic solution technique for resource-constrained project scheduling", Annals of Operations Research, Vol. 102, pp. 65–81, (2001).
19. Ranjbar, M. Reyck, B. and De Kianfar, F., "A hybrid scatter search for the discrete time/resource trade-off problem in project scheduling", *European Journal of Operational Research,* Vol. 193(1), pp. 35–48, (2009).
20. Alcaraz, J. Maroto, C. and Ruiz, R., "Solving the multi-mode resource-constrained project scheduling problem with genetic algorithms", *Journal of the Operational Research Society,* Vol. 54, pp. 614–626, (2003).